微藻油和鱼油对鸡蛋品质和蛋黄脂肪酸沉积的影响

龙　烁[1]　武书庚[1*]　齐广海[1]　张海军[1*]　王　晶[1]　马友彪[1]　杨林林[1]　禹振军[2]

（1.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点开放试验室，生物饲料开发国家工程研究中心，北京　100081；2.北京市农业机械试验鉴定推广站，北京　100081）

摘　要：本试验旨在研究饲粮添加微藻油（MO）和鱼油（FO）对蛋黄脂肪酸沉积和蛋品质（鲜蛋与储存期）的影响，以期为高效生产富含二十二碳六烯酸（DHA）的鸡蛋提供依据。选取31周龄产蛋率接近的海兰褐蛋鸡630只，随机分为7个组，每组6个重复，每个重复15只鸡。对照组饲喂基础饲粮（不额外补充DHA），试验组以MO和FO分别作为DHA源添加1.35、2.70、5.40 mg/g的DHA，其中MO添加量为0.25%、0.50%和1.00%，FO添加量为添加1.08%、2.17%和4.34%。预试期1周，正试期12周。结果表明：1）试验末期各组蛋壳强度、蛋壳厚度、蛋形指数和哈氏单位均无显著差异（P>0.05）；试验4周，1.35 mg/kg DHA组蛋白高度显著高于2.70和5.40 mg/g DHA组（P<0.05）；试验8周，与对照组相比，试验组蛋黄颜色均显著升高（P<0.05）。2）储存28 d，各组间蛋黄丙二醛（MDA）含量无显著差异（P>0.05）；随着储存时间延长，蛋黄MDA含量显著升高（P<0.05）。3）储存14 d，MO组哈氏单位显著高于FO组（P<0.05）；储存14 d，DHA源和添加水平的互作效应对蛋白高度影响显著（P<0.05），MO组蛋白高度随DHA添加水平升高而升高，FO组蛋白高度随DHA添加水平升高呈现先升高后降低趋势；储存7和28 d，FO组蛋黄颜色显著高于MO组（P<0.05）。4）与对照组相比，饲粮添加不同来源和水平DHA极显著提高蛋黄DHA、α-亚麻酸、二十碳五烯酸、单不饱和脂肪酸、ω-3多不饱和脂肪酸（PUFA）含量（P<0.01），且FO组显著高于MO组（P<0.05），极显著降低ω-6 PUFA/ω-3 PUFA值（P<0.01）。鸡蛋DHA沉积效率随DHA添加水平升高而极显著降低（P<0.01）。综上，在本试验条件下，相同DHA添加水平下，FO比MO更能促进蛋黄DHA的沉积，且添加水平为1.35 mg/g时DHA沉积效率最高。

关键词：微藻油；鱼油；DHA；蛋品质；沉积效率；蛋鸡

中图分类号：S816

二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid，DHA)是一种ω-3 系列的长链多不饱和脂肪酸

收稿日期：2017–10–16

基金项目：家禽产业技术体系北京市创新团队（CARS-PSTP）

作者简介：龙　烁（1993—），女，山东临沂人，硕士研究生，从事家禽营养与饲料科学研究。E-mail: maplega@163.com

*通信作者：武书庚，研究员，硕士生导师，E-mail: wushugeng@caas.cn；张海军，副研究员，硕士生导师，E-mail: fowlfeed@163.com

（PUFA），是大脑中的主要功能物质之一。ω-3 PUFA 还包括α-亚麻酸（ALA）、二十碳五烯酸（EPA）等，在脂质代谢及合成生物活性分子中发挥重要作用[1]。DHA 能促进视网膜和脑发育，预防和治疗心血管疾病，调节机体免疫机能，抑制炎症反应，对人和动物的生长和生产均有积极作用。目前人类所需的 DHA 主要有 2 种来源，一类是富含 DHA 的物质，如深海鱼油、鱼油（fish oil，FO）、微藻等，以及富含 DHA 的动物产品（鸡蛋、肉类）等；另一类是富含 ALA 的物质，如亚麻籽、紫苏籽等，在体内脱氢酶和延长酶的作用下转化为 DHA[2]。作为ω-3 PUFA 的原始来源，微藻增加了海洋鱼类ω-3 PUFA 含量，还能通过饲粮增加鸡蛋中ω-3 PUFA 含量，补充人体膳食中ω-3 PUFA 的不足。较微藻粉而言，微藻油（microalgae oil，MO）成分单一，影响蛋黄中脂肪酸沉积的其他因素较少。研究表明，饲粮中补充 FO[3]和微藻[4]均能增加蛋黄 DHA 含量。但未见饲粮中添加相同 DHA 水平的 MO 和 FO 对蛋鸡脂肪酸沉积和蛋品质影响的报道。因此，本试验在高峰期产蛋鸡饲粮中添加相同 DHA 水平的 MO 和 FO，探索 2 种 DHA 源对蛋鸡蛋黄脂肪酸沉积和蛋品质（鲜蛋与储存期）的影响，以期为生产富含 DHA 鸡蛋提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计与试验饲粮

试验选用 31 周龄体况良好、产蛋率接近的海兰褐蛋鸡 630 只，随机分为 7 个组，每组 6 个重复，每个重复 15 只鸡。对照组饲喂基础饲粮（不额外补充 DHA），试验组以 MO 和 FO 作为 DHA 源添加 1.35、2.70 和 5.40 mg/g 的 DHA，其中 MO 添加量为 0.25%、0.50% 和 1.00%（实测 DHA 含量为 1.1、2.4 和 4.1 mg/g），FO 添加量为 1.08%、2.17%和 4.34%（实测 DHA 含量为 1.1、2.7 和 4.5 mg/g），试验设计见表 1。MO 购自厦门金达威集团股份有限公司，FO 购自佛山市大茂饲料有限公司，实测 DHA 含量分别为 543 和 125 mg/g。各组饲粮等氮等能，参照《鸡饲养标准》（NY/T 33—2004）配制，其组成及营养水平见表 2，脂肪酸组成见表 3。

表 1　试验设计

Table 1　Experimental design

项目 Items	组别 Groups						
	1	2	3	4	5	6	7
DHA 添加水平 DHA supplemental level/(mg/g)		1.35	2.70	5.40	1.35	2.70	5.40

微藻油 Microalgae oil/%		0.25	0.50	1.00			
鱼油 Fish oil/%					1.08	2.17	4.34

表 2 试验饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2 Composition and nutrient levels of the experimental diets (air-dry basis) %

项目 Items	组别 Groups						
	1	2	3	4	5	6	7
原料 Ingredients							
玉米 Corn	55.45	57.18	56.55	55.82	55.75	54.88	51.20
豆粕 Soybean meal	27.47	27.49	27.63	27.44	27.40	27.20	26.61
麦麸 Wheat bran	1.00			0.90	1.00	2.00	4.00
微藻油 Microalgae oil		0.25	0.50	1.00			
鱼油 Fish oil					1.08	2.17	4.34
棕榈油 Palm oil	4.20	3.20	3.20	2.90	2.50	1.80	
石粉 Limestone	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
食盐 NaCl	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
DL–蛋氨酸 *DL*-Met	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.21
赖氨酸 Lys							0.13
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
预混料 Premix[1)]	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
抗氧化剂 Antioxidant[2)]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
沸石粉 Zeolite powder			0.24	0.06	0.39	0.07	1.72
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[3)]							
代谢能 ME/(MJ/kg)	11.49	11.49	11.49	11.49	11.49	11.49	11.49
粗蛋白质 CP	16.81	16.81	16.81	16.81	16.81	16.81	16.81
钙 Ca	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37
有效磷 AP	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
蛋氨酸 Met	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.44
赖氨酸 Lys	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89

蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.65	0.65	0.64	0.65	0.65	0.64	0.65

[1)]预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of diets:VA 12 500 IU，VD_3 4 125 IU，VE 15 IU，VK 2 mg，硫胺素 thiamine 1 mg，核黄素 riboflavin 8.5 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 11 mg，烟酸 niacin 32.5 mg，吡哆醇 pyridoxine 8 mg，生物素 biotin 0.5 mg，叶酸 folic acid 1.25 mg，VB_{12} 0.02 mg，Mn 65 mg，I 1 mg，Fe 60 mg，Cu 8 mg，Zn 66 mg，胆碱 choline 1000 mg，植酸酶 phytase 300mg，蒙脱石 montmorillonite 1 000 mg，酵母培养物 yeast culture 10 g。

[2)]抗氧化剂为每千克饲粮提供 Antioxidant provided the following per kg of diets:乙氧基喹啉 ethoxyquin 150 mg，VE 100 mg，茶多酚 tea polyphenols 50 mg。

[3)]代谢能和有效磷为计算值，其余为实测值。ME and AP were calculated values, while the others were measured values.

表 3　饲粮脂肪酸组成（干物质基础）

Table 3　Fatty acid composition of experimental diets (DM basis)　　mg/g

项目 Items	组别 Groups						
	1	2	3	4	5	6	7
C12:0	0.31	0.34	0.29	0.34	0.28	0.28	0.33
C14:0	0.51	0.47	0.60	0.66	1.12	2.24	3.27
C15:0	0.03	0.05	0.08	0.13	0.10	0.22	0.36
C16:0	24.47	19.46	22.39	19.47	18.61	20.60	14.59
C16:1	0.15	0.12	0.16	0.19	1.7	2.46	3.82
C17:0	0.09	0.09	0.13	0.16	0.16	0.31	0.44
C18:0	3.08	2.39	2.68	2.29	2.56	3.21	2.80
C18:1 n9*c*	28.87	21.94	24.50	20.93	20.61	21.20	13.00
C18:2 n6*c*	24.39	21.56	23.06	21.93	21.95	23.09	20.92
C18:3 n3	0.32	0.41	0.63	1.05	0.44	0.84	1.24
C20:0	0.06	0.27	0.31	0.28	0.30	0.38	0.39
C20:1	0.16	0.13	0.14	0.13	0.28	0.52	0.81
C21:0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	0.12
C20:3 n6	0.0	0.02	0.04	0.07	0.02	0.05	0.08

C20:4 n6	0.0	0.04	0.04	0.07	0.15	0.33	0.50
C20:5 n3	0.02	0.02	0.03	0.06	1.13	2.79	4.51
C22:0	0.03	0.13	0.13	0.18	0.13	0.17	0.16
C24:0	0.17	0.15	0.17	0.18	0.30	0.57	0.76
C22:6 n3	0.03	1.09	2.37	4.14	1.13	2.73	4.55
C24:1	0.01	0.01	0.02	0.05	0.05	0.11	0.05
饱和脂肪酸 SFA	28.75	23.37	26.81	23.70	23.59	28.03	23.23
多不饱和脂肪酸 PUFA	25.88	24.10	26.95	27.62	25.81	29.03	30.61
ω-3 多不饱和脂肪酸 ω-3 PUFA	1.49	2.49	3.81	5.56	3.70	5.56	9.10
ω-6 多不饱和脂肪酸 ω-6 PUFA	24.39	21.62	23.14	22.07	22.11	23.47	21.51
ω-6 多不饱和脂肪酸/ω-3 多不饱和脂肪酸 ω-6 PUFA/ω-3 PUFA	16.36	8.69	6.07	3.97	5.97	4.22	2.36

1.2　饲养管理

试验鸡采用三层立体笼养，每笼 3 只，采用随机编号安排组位，避免环境和位置影响。自由采食和饮水，自然光照加人工补光（16 h/d），光照强度 20 lx，舍温（20±2）℃，相对湿度 50%~60%，自然通风结合纵向负压通风；每天清粪 2 次，每周消毒 1 次，常规免疫。每天喂料 3 次（08：00、13：00 和 18：00），捡蛋 1 次。试验预试期 1 周，正试期 12 周。

1.3　测定指标与方法

1.3.1　鸡蛋品质

试验第 4、8 和 12 周末，每重复随机取 3 个蛋，测定蛋品质。采用 SONOVA 蛋品质自动分析仪（Egg AnalyzerTM,Orka Technology Ltd.）测定蛋重、浓蛋白高度、哈氏单位、蛋黄颜色；蛋壳强度分析仪（Egg Force Reader,Orka Technology Ltd.）测定蛋壳强度；蛋壳厚度测定仪（PEACOCK P–1，日本）测定蛋壳厚度；蛋形指数测定仪（Egg Index Reader，Fujibira Industry Co., Ltd.）测量蛋形指数。蛋成分分析：全蛋、蛋壳和蛋黄分别称重，并统计蛋壳和蛋黄比例。

1.3.2　储存期鸡蛋品质

试验 12 周末，每重复取 9 枚蛋，共 378 枚，称重并记录鲜蛋重，置 4 ℃、相对湿度 65%，冷藏 7、14 和 28 d 后，分别测定不同储存时间失水率、鸡蛋品质。分离蛋黄并称重，混合搅拌均匀后，－20 ℃储存备用。

1.3.3　储存期蛋黄丙二醛（MDA）含量检测

取存于－20 ℃蛋黄，采用硫代巴比妥钠（TBA）法测定蛋黄 MDA 含量，测定试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

制备蛋黄匀浆：取 0.1 mL 蛋黄样品，加 4.5 mL 无水乙醇，样品研磨仪（上海静信科技有限公司）60 Hz 混 120 s，4 000 r/min 离心 10 min，取上清 0.2 mL 测定 MDA 含量。

1.3.4　饲粮、蛋黄中脂肪酸含量检测

饲粮粉碎至粉末状，取（100±10） mg 样品，移至 15 mL 螺口玻璃试管，依次加入 2 mL 正己烷和 1 mL 内标液，再加入 4 mL 甲醇∶氯乙酰混合液。混匀器混匀，80 ℃水浴 2 h。冷却至室温，缓慢加入 5 mL 7%碳酸钾，涡旋混匀，4 000 r/min 离心 10 min，取上层分析。使用 GC–450 气相色谱仪（天美科学仪器有限公司），采用 Agilent DB–23 色谱柱（60 m×250 μm×0.25 μm）。氦气为载气，恒流量 1.00 mL/min；检测器温度 280 ℃；进样口温度 270 ℃；程序性升温：100 ℃维持 5min 后，以 4 ℃/min 升温至 240 ℃，进样量 1.0 μL。正己烷为清洗液，进样前后各清洗 3 次。

试验 12 周末，每重复取 2 枚蛋，去壳，蛋黄混匀，冻干。取（90±10） mg 蛋黄粉进行脂肪酸检测，检测方法同饲粮中脂肪酸检测方法。

1.3.5　蛋中 DHA 沉积效率

根据料蛋比，计算蛋中 DHA 沉积效率，计算公式：

DHA 沉积效率（%）=100×1 kg 鸡蛋中 DHA 量/生产 1 kg 鸡蛋摄入的 DHA 量；

1 kg 鸡蛋中 DHA 量=1 000×蛋黄指数×（1－蛋黄冻干失水率）×蛋黄 DHA 水平（mg/g）；

生产 1 kg 鸡蛋摄入的 DHA 量=1 000×料蛋比×饲粮 DHA 水平（mg/g）。

1.4　统计分析

试验数据采用 SPSS 19.0 软件中一般线性模型（GLM）程序进行因子分析，对 DHA 源和剂量的主效应及互作效应进行多元方差分析，采用 Duncan 氏法进行多重比较和指标的相关分析，显著水平为 $P<0.05$，极显著水平为 $P<0.01$，结果以平均值和标准误表示。

2　结果与分析

2.1　不同 DHA 源和添加水平对鸡蛋品质的影响

由表 4 可知，不同 DHA 源、水平及其互作效应对蛋壳厚度和蛋形指数均无显著影响（P>0.05）；第 4 周时，蛋壳强度受 DHA 源和水平的互作效应影响显著（P<0.05），MO 组蛋壳强度随添加剂量增加呈先下降后上升趋势，FO 组呈先升高后下降趋势。第 4 周时，哈氏单位和蛋白高度受 DHA 水平影响显著（P<0.05），1.35 mg/kg DHA 组显著高于 5.40 mg/g DHA 组（P<0.05），在第 8 和 12 周时各组无显著差异（P>0.05）。第 8 周时，与对照组相比，所有 DHA 组蛋黄颜色均显著升高（P<0.05），不同 DHA 源、添加水平及其互作效应对蛋黄颜色无显著影响（P>0.05）；蛋黄指数在第 8 周时受 DHA 水平影响显著（P<0.05），2.70 mg/g DHA 组最高，显著高于 1.35 mg/g DHA 组（P<0.05），第 12 周时各组间蛋黄指数无显著差异（P>0.05）。综上，本试验条件下，除哈氏单位、蛋白高度、蛋黄颜色和蛋黄指数外，饲粮添加 DHA 对试验全期鸡蛋内部其他品质无显著影响。

2.2　不同 DHA 源和添加水平对储存期蛋黄 MDA 含量的影响

由表 5 可知，储存 7 和 14 d，蛋黄 MDA 含量受 DHA 添加水平影响显著（P<0.05），5.40 mg/g DHA 组蛋黄 MDA 含量显著高于 1.35 mg/g DHA 组（P<0.05）；储存 7 d 时，7 组蛋黄 MDA 含量最高；储存 28 d，各组间蛋黄 MDA 含量差异不显著（P>0.05）。由表 6 可知，蛋黄 MDA 含量随 DHA 添加水平增加而增加（P<0.01），7 组最高；蛋黄 MDA 含量随储存时间延长而极显著增加（P<0.01）。

2.3　不同 DHA 源和添加水平对储存期鸡蛋品质的影响

由表 5 可知，DHA 源、添加水平及其互作效应对不同储存时间鸡蛋失水率、蛋黄指数无显著影响（P>0.05）；储存 14 d 时，哈氏单位受 DHA 源和互作效应影响显著（P<0.05），MO 组哈氏单位显著高于 FO 组（P<0.05），但储存 28 d 时哈氏单位各组间无显著影响（P>0.05）。储存 14 d 时 DHA 源和添加水平的互作效应对蛋白高度的影响显著（P<0.05），MO 组蛋白高度随添加水平升高而逐渐升高，而 FO 组蛋白高度随添加剂量增加呈现先升高后降低趋势；储存 28 d 时，各组蛋白高度无显著差异（P>0.05）。储存 7 和 28 d 时，FO 组蛋黄颜色显著高于 MO 组（P<0.05），不同 DHA 添加水平对蛋黄颜色无显著影响（P>0.05）。由表 6 可知，随储存时间延长，鸡蛋失水率、蛋黄颜色和蛋黄指数极显著增加（P<0.01），哈氏单位和蛋白高度极显著降低（P<0.01）。从整个储存期看，3 组哈氏单位显著高于 7 组（P<0.05）；7 组蛋白高度显著低于对照组、3 组和 4 组（P<0.05），蛋黄颜色显著高于对照组和 1 组（P<0.05）。

2.4　不同 DHA 源和添加水平对蛋黄脂肪酸含量和组成的影响

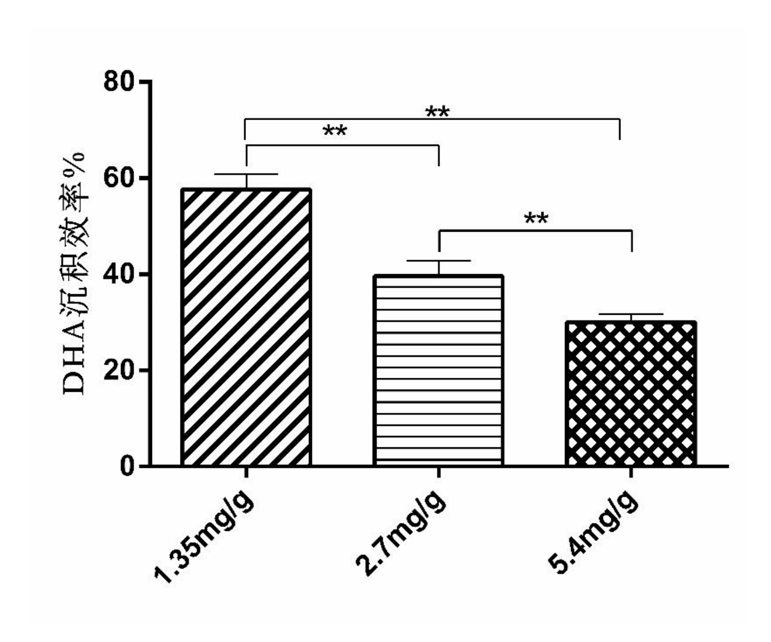
由表 7 可知，蛋黄 DHA、EPA 含量受 DHA 源、添加水平及互作效应影响极显著（P<0.01）。

FO 组蛋黄 DHA、EPA 含量显著高于 MO 组（P<0.05），且随着添加量增加，蛋黄 DHA、EPA 含量极显著增加（P<0.01）。7 组蛋黄 DHA、EPA 含量最高，显著高于其他各组（P<0.05）；与对照组相比，各试验组蛋黄 DHA 含量分别增加了 183.01%、286.10%、363.32%、231.66%、290.35%、410.81%。蛋黄 ALA 含量随添加剂量增加极显著增加（P<0.01）。

蛋黄单不饱和脂肪酸（MUFA）受 DHA 源、添加水平及互作效应影响极显著（P<0.01）。MO 组显著高于 FO 组（P<0.05），且随着添加量增加，蛋黄 MUFA 含量极显著降低（P<0.01）。7 组蛋黄 MUFA 含量最低，显著低于对照组（P<0.05）。蛋黄 PUFA 含量受 DHA 源、添加水平及互作效应影响显著（P<0.05），MO 组显著高于 FO 组（P<0.05），且随着添加量增加，蛋黄 PUFA 含量极显著增加（P<0.01），5.40 mg/g DHA 组分别比 1.35 和 2.70 mg/g DHA 组增加了 9.28%和 16.79%，4 组 PUFA 含量最高，显著高于其他各组（P<0.05）。

由表 7 可知，蛋黄ω-3 PUFA 含量受 DHA 源、添加水平及互作效应影响极显著（P<0.01）。FO 组蛋黄ω-3 PUFA 含量显著高于 MO 组（P<0.05），5.40 mg/g DHA 组显著高于 1.35 和 2.70 mg/g DHA 组（P<0.05）；7 组ω-3 PUFA 含量最高，比对照组增加了 363.80%（P<0.05），4 组ω-3 PUFA 含量比对照组增加了 267.71%（P<0.05）。蛋黄ω-6 PUFA 含量受 DHA 源影响极显著（P<0.01），MO 组显著高于 FO 组（P<0.05）；5 组和 7 组蛋黄ω-6 PUFA 含量显著低于对照组（P<0.05）。

ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值受 DHA 源、添加水平及互作效应影响显著（P<0.05），FO 组蛋黄ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值显著低于 MO 组（P<0.05），且随着添加剂量增加极显著降低（P<0.01），7 组ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值最低；与对照组相比，试验组蛋黄ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值均显著降低（P<0.05）。由图 1、图 2 可知，鸡蛋 DHA 沉积效率随添加剂量增加而极显著下降（P<0.01）。



**代表差异极显著 *P*<0.01。图 2 同。

** mean extremely significantly different （*P*<0.01）. The same as Fig.2.

图 1　MO 组鸡蛋 DHA 沉积效率

Fig.1　Deposition efficiency of DHA in the egg for MO groups

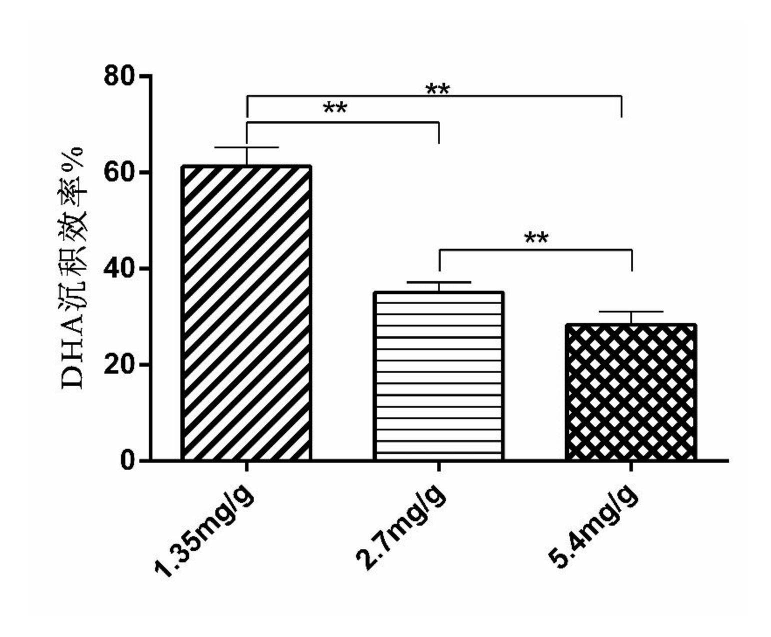


图 2　FO 组鸡蛋 DHA 沉积效率

Fig.2　Deposition efficiency of DHA in the egg for FO groups

表 4　不同 DHA 源和添加水平对鸡蛋品质的影响

项目 Items	时间 Time/周	组别 Groups							标准误 SEM	*P*-值 *P*-value	来源 Sources		添加水平 Supplemental levels/(mg/kg)			标准误 SEM	来源 Source	添加水平 Supplemental level	互作 Interaction
		1	2	3	4	5	6	7			微藻油 MO	鱼油 FO	1.35	2.70	5.40				
蛋壳强度 Eggshell strength/(N/cm^2)	4	42.41	41.96	38.97	40.36	38.40	42.74	38.86	0517	0.081	40.43	40.00	40.18	40.86	39.61	0.515	0.679	0.617	0.020
	8	42.97	40.97	44.70	40.32	41.96	42.01	43.12	0.586	0.529	42.00	42.37	41.46	43.37	41.72	0.668	0.778	0.459	0.252
	12	42.82	41.77	43.82	43.31	40.82	41.08	41.83	0.406	0.362	42.97	41.24	41.29	42.45	42.57	0.444	0.061	0.442	0.702
蛋壳厚度 Eggshell thickness/mm	4	0.38	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37	0.36	0.027	0.283	0.36	0.37	0.37	0.37	0.36	0.002	0.611	0.659	0.279
	8	0.37	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.37	0.009	0.304	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.001	0.059	0.269	0.595
	12	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.002	0.919	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.002	0.661	0.894	0.470
蛋形指数 Egg index	4	1.31	1.33	1.32	1.31	1.33	1.31	1.30	0.004	0.431	1.32	1.32	1.33	1.32	1.31	0.004	0.553	0.101	0.900
	8	1.33	1.34	1.32	1.34	1.34	1.34	1.33	0.004	0.871	1.33	1.34	1.34	1.33	1.33	0.004	0.740	0.638	0.431
	12	1.34	1.34	1.33	1.36	1.36	1.34	1.34	0.003	0.235	1.34	1.34	1.35	1.33	1.35	0.004	0.681	0.188	0.122
哈氏单位 Haugh unit	4	87.51	90.01	87.06	87.32	89.52	85.96	83.69	0.588	0.068	88.04	86.39	89.78[a]	86.51[ab]	85.50[b]	0.593	0.147	0.017	0.534

Table 4　Effects of different sources and supplemental levels of DHA on egg quality

	8	80.95	82.73	84.21	79.34	81.99	81.32	81.69	0.822	0.846	82.09	81.67	82.36	82.76	80.52	0.949	0.824	0.595	0.534
	12	85.76	84.68	83.65	84.34	85.51	83.27	87.97	0.534	0.281	84.22	85.59	85.09	83.46	86.16	0.580	0.249	0.178	0.363
蛋白高度 Albumen height/mm	4	7.86	8.22	7.69	7.69	8.12	7.47	7.66	0.076	0.066	7.84	7.75	8.16^{a}	7.59^{b}	7.67^{b}	0.068	0.390	0.003	0.852
	8	6.46	7.22	7.24	6.53	6.84	6.67	6.96	0.126	0.536	7.00	6.82	7.03	6.95	6.75	0.128	0.503	0.648	0.257
	12	7.52	7.35	7.02	7.19	7.41	6.88	7.80	0.092	0.123	7.19	7.36	7.38	6.95	7.49	0.097	0.374	0.071	0.287
蛋黄颜色 Egg yolk color	4	6.06	6.8	6.72	6.27	6.94	6.89	5.86	0.128	0.110	6.58	6.56	6.88^{a}	6.81^{a}	6.07^{b}	0.135	0.897	0.037	0.605
	8	7.17^{b}	8.11^{a}	8.61^{a}	8.33^{a}	8.67^{a}	8.44^{a}	8.22^{a}	0.103	<0.001	8.35	8.44	8.39	8.53	8.27	0.083	0.581	0.476	0.159
	12	7.89	7.89	7.94	8.22	7.78	8.40	8.28	0.086	0.363	8.02	8.16	7.83	8.18	8.25	0.089	0.440	0.123	0.600
蛋黄指数 Egg yolk rate/%	4	25.78	25.84	25.58	24.68	25.72	25.64	25.16	0.143	0.290	25.34	25.51	25.78	25.61	24.92	0.161	0.665	0.085	0.745
	8	26.26	26.03	26.95	26.72	25.97	27.13	26.01	0.144	0.132	26.57	26.37	26.00^{b}	27.04^{a}	26.37^{ab}	0.149	0.517	0.025	0.470
	12	25.77	26.17	25.87	26.56	25.75	25.98	26.29	0.164	0.854	26.20	26.00	25.96	25.93	26.42	0.191	0.616	0.503	0.848

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05），相同小写字母或无字母表示差异不显著（P>0.05）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same small letter or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as blow.

表 5　不同 DHA 源和添加水平对储存期鸡蛋品质的影响

Table 5　Effects of different sources and supplemental levels of DHA on egg quality at storage period

项目 Items	时间 Time/d	组别 Groups 1	2	3	4	5	6	7	标准误 SEM	P-值 P-value	来源 Sources 微藻油 MO	鱼油 FO	添加水平 Supplemental levels/(mg/kg) 1.35	2.70	5.40	标准误 SEM	来源 Source	添加水平 Supplemental level	互作 Interaction
蛋黄丙二醛 MDA in yolk/(nmol/mL)	7	135.18^{c}	160.39^{bc}	184.35^{abc}	226.74^{ab}	142.19^{c}	194.26^{bc}	234.31^{a}	8.111	<0.001	190.49	190.25	151.29^{y}	189.31^{xy}	230.53^{x}	7.121	0.987	<0.001	0.674
	14	193.06	226.19	228.68	266.96	222.33	235.63	298.71	11.320	0.072	242.41	255.96	224.59^{y}	232.15^{y}	282.83^{x}	10.382	0.377	0.046	0.132
	28	217.73	230.65	247.79	271.58	258.12	272.64	305.82	10.070	0.307	250.12	278.86	244.36	261.35	288.70	10.767	0.250	0.263	0.984
失水率 Water lose rate/%	7	0.27	0.26	0.24	0.25	0.27	0.27	0.28	0.006	0.609	0.25	0.27	0.26	0.25	0.27	0.006	0.093	0.708	0.719
	14	0.65	0.58	0.49	0.63	0.64	0.57	0.31	0.012	0.170	0.57	0.60	0.61	0.58	0.62	0.018	0.375	0.082	0.406
	28	2.09	1.86	1.86	2.04	1.93	2.09	1.95	0.036	0.397	1.92	1.98	1.89	1.97	2.00	0.014	0.417	0.597	0.287
哈氏单位 Haugh unit	7	81.63	79.29	83.80	80.76	78.38	77.26	80.59	0.701	0.222	81.28	78.74	78.84	80.53	80.68	0.666	0.066	0.464	0.120
	14	77.63^{ab}	78.10^{ab}	78.76^{ab}	81.90^{a}	75.73^{bc}	76.99^{ab}	71.89^{c}	0.729	0.01	79.59	74.85	76.91	77.88	76.89	0.710	0.002	0.814	0.044
	28	76.37	75.39	74.29	72.40	73.2	73.92	74.59	0.527	0.516	74.03^{m}	73.90^{n}	74.29	74.10	73.50	0.616	0.920	0.860	0.359
蛋白高度 Albumen height/mm	7	6.96	6.59	7.18	6.67	6.31	6.57	6.59	0.087	0.150	6.81	6.49	6.45	6.88	6.63	0.084	0.061	0.136	0.423
	14	6.27	6.01	6.36	6.92	6.16	6.50	5.22	0.141	0.052	6.43	5.96	6.08	6.43	6.07	0.145	0.116	0.521	0.019

	28	6.04	5.93	5.76	5.57	5.55	5.64	5.72	0.065	0.338	5.76	5.64	5.74	5.70	5.64	0.074	0.446	0.866	0.347
蛋黄颜色 Egg yolk color	7	8.11	8.00	7.94	7.94	8.33	8.33	8.38	0.074	0.440	7.96^{n}	8.35^{m}	8.17	8.14	8.17	0.085	0.029	0.988	0.965
	14	8.00	7.91	8.5	8.25	8.17	8.25	8.67	0.105	0.522	8.22	8.36	8.04	8.38	8.46	0.118	0.562	0.328	0.497
	28	8.27	8.32	8.54	8.71	8.75	8.79	8.93	0.072	0.079	8.52^{n}	8.82^{m}	8.53	8.67	8.82	0.061	0.020	0.180	0.753
蛋黄指数 Egg yolk rate/%	7	26.18	26.87	27.53	27.08	26.25	27.33	26.55	0.156	0.124	27.16	26.71	26.56	27.43	26.81	0.163	0.173	0.098	0.853
	14	26.57	26.34	26.75	26.99	26.83	26.79	26.54	0.177	0.978	26.70	26.72	26.59	26.78	26.77	0.197	0.956	0.905	0.628
	28	28.41	28.22	28.47	28.57	26.68	28.69	27.15	0.229	0.108	28.41	27.51	27.45	28.58	27.86	0.246	0.074	0.181	0.274

表 6　不同 DHA 添加水平和储存时间对存储期鸡蛋品质的影响

Table 6　Effects of different supplementation level of DHA and storage time on egg quality in storage period

项目 Items	蛋黄丙二醛 MDA in yolk/(nmol/mL)	失水率 Water lose rate/%	哈氏单位 Haugh unit	蛋白高度 Albumen height/mm	蛋黄颜色 Egg yolk color	蛋黄指数 Egg yolk rate/%
组别 Groups						
1	179.88^{d}	1.00	78.54^{ab}	6.43^{a}	8.12^{b}	27.05
2	203.17^{cd}	0.90	77.59^{ab}	6.18^{ab}	8.08^{b}	27.15
3	218.66b^{cd}	0.86	78.95^{a}	6.43^{a}	8.33^{ab}	27.58
4	255.09^{ab}	0.98	78.23^{ab}	6.39^{a}	8.30^{ab}	27.55
5	205.70^{cd}	0.95	75.76^{b}	6.01^{ab}	8.42^{ab}	26.58

6	234.18[bc]	0.97	76.06[ab]	6.24[ab]	8.46[ab]	27.61
7	279.61[a]	0.95	75.69[b]	5.84[b]	8.66[a]	26.74

项目 Items	组别 Groups							标准误 SEM	*P*-值 *P*-value	来源 Sources		添加水平 Supplemental levels/(mg/kg)			标准误 SEM	来源 Source	添加水平 Supple	互作 Interaction
	1	2	3	4	5	6	7			微藻油	鱼油 FO	1.35	2.70	5.40				

储存时间 Storage time/d						
7	182.49[y]	0.26[z]	80.24[x]	6.70[x]	8.15[y]	26.83
14	240.32[x]	0.60[y]	77.28[y]	6.20[y]	8.25[y]	26.69
28	259.01[x]	1.98[x]	74.31[z]	5.75[z]	8.61[x]	28.03
SEM	4.885	0.013	0.356	0.055	0.049	0.107
P 值 *P*-value						
饲粮 Diet	<0.001	0.105	0.044	0.036	0.029	0.052
储存时间 Storage time	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
饲粮×储存时间 Diet×storage time	0.986	0.606	0.050	0.050	0.897	0.510

表 7　不同 DHA 源和添加水平对蛋黄脂肪酸含量和组成的影响(干物质基础)

Table 7　Effects of different sources and supplemental levels of DHA on contents and composition of fatty acids in yolk （DM basis）

										MO							mental level	
二十二碳六烯酸 DHA/(mg/g)	2.59^{f}	7.33^{e}	10.00^{c}	12.00^{b}	8.59^{d}	10.11^{c}	13.23^{a}	0.508	<0.001	9.78^{n}	10.65^{m}	7.96^{z}	10.05^{y}	12.62^{x}	0.089	<0.001	<0.001	0.005
α-亚麻酸 ALA/(mg/g)	0.96^{d}	1.01^{cd}	1.18^{b}	1.57^{a}	1.06^{c}	1.25^{b}	1.54^{a}	0.037	<0.001	1.26	1.28	1.03^{z}	1.22^{y}	1.55^{x}	0.013	0.347	<0.001	0.275
二十碳五烯酸 EPA/(mg/g)	0.12^{f}	0.15^{f}	0.36^{e}	0.52^{d}	0.82^{c}	1.48^{b}	3.01^{a}	0.152	<0.001	0.34^{n}	1.77^{m}	0.48^{z}	0.92^{y}	1.76^{x}	0.021	<0.001	<0.001	<0.001
单不饱和脂肪酸 MUFA/(mg/g)	162.75^{a}	160.02^{a}	151.65^{b}	141.41^{c}	145.97^{c}	133.40^{d}	132.27^{d}	1.812	<0.001	151.03^{m}	137.21^{n}	152.99^{x}	142.53^{y}	136.84^{z}	0.500	<0.001	<0.001	0.008
多不饱和脂肪酸 PUFA/(mg/g)	52.30^{b}	52.29^{b}	57.82^{b}	64.71^{a}	52.27^{b}	56.56^{b}	57.42^{b}	0.789	<0.001	58.27^{m}	55.38^{n}	52.28^{z}	57.13^{y}	61.06^{x}	0.535	<0.001	<0.001	0.022
ω-3 多不饱和脂肪酸 ω-3 PUFA/(mg/g)	3.84^{g}	8.48^{f}	11.5^{d}	14.12^{b}	10.48^{e}	12.86^{c}	17.81^{a}	0.642	<0.001	11.38^{n}	13.72^{m}	9.48^{z}	12.21^{y}	15.96^{x}	0.084	<0.001	<0.001	<0.001
ω-6 多不饱和脂肪酸 ω-6 PUFA/(mg/g)	47.80^{a}	47.17^{a}	47.03^{a}	47.65^{a}	40.79^{bc}	43.59^{ab}	38.94^{c}	0.752	<0.001	47.28^{m}	41.11^{n}	43.89	45.31	43.30	0.581	<0.001	0.369	0.196
ω-6 多不饱和脂肪酸/ω-3 多不饱和脂肪酸 ω-6 PUFA/ω-3 PUFA	12.46^{a}	5.57^{b}	4.08^{c}	3.37^{c}	3.90^{c}	3.39^{c}	2.19^{d}	0.505	<0.001	4.34^{m}	3.16^{n}	4.74^{x}	3.73^{y}	2.78^{z}	0.063	<0.001	<0.001	0.013

3 讨　论

3.1　不同 DHA 源和添加水平对鸡蛋品质的影响

本实验室之前的研究表明，0.5%的 MO 对蛋品质无显著影响[5]。本研究表明，蛋鸡饲粮分别添加 1.35、2.70 和 5.40 mg/kg 的 DHA（分别来自 FO 和 MO），第 4 周时，可能是 7 组鱼油添加量过高（4.34%），对蛋鸡机体产生一定的应激导致 5.40 mg/kg DHA 组哈氏单位和蛋白高度显著低于 1.35 mg/g DHA 组，不过，随着饲喂时间的延长，各组间差异逐渐消失。第 8 周时，各试验组蛋黄颜色显著高于对照组，表明饲粮中补充 MO 和 FO 促进β类胡萝卜素在蛋黄中沉积，这与卢元鹏等[6]的研究结果一致，但也有研究表明添加 5%的 FO 对蛋黄颜色没有显著影响[7]。从试验全期来看，试验处理对高峰期鸡蛋内部品质无显著影响，这与添加微藻粉结果[8]一致。Saleh[3]在饲粮中添加 1.25%、2.50%、3.75%和 5.00%的 FO 不影响蛋形指数、蛋白高度、蛋黄指数和哈氏单位，与本试验结果一致；其中 3.75%组蛋壳厚度显著高于对照组。另有报道，与豆油相比，FO 降低了蛋壳厚度[9]，3%FO 降低蛋壳质量[10]。蛋壳品质受蛋鸡饲粮中钙、磷、维生素 D_3 以及微量元素的影响，其中锰、锌、铜对蛋壳品质影响较大[11]，所以饲粮中添加 DHA 对鸡蛋厚度的影响有别。蛋鸡饲粮补充 DHA 是否会影响蛋壳厚度，尚需进一步研究。

3.2　不同 DHA 源和添加水平对储存期蛋黄 MDA 含量的影响

饲粮中加入不饱和油脂显著影响生物膜的抗氧化力[12]，通过饲粮中补充 DHA，可增加生物膜 DHA、降低ω-6 PUFA 含量。蛋鸡饲粮中添加亚麻籽[13]、FO[14]均可升高蛋黄 MDA 含量，但添加 3%的裂壶藻干粉未见影响蛋黄脂肪酸的氧化，且 4 ℃储存 30 d，与对照组氧化值仍无显著差异[15]。本试验结果表明，储存 7 和 14 d 时，蛋黄 MDA 含量受 DHA 添加水平影响显著；储存 28 d 时，各组间 MDA 含量无显著差异。表明随储存时间的延长，各组蛋黄 MDA 含量均显著增加，表明储存时间越久蛋黄中过氧化产物越多。

3.3　不同 DHA 源和添加水平对储存期鸡蛋品质的影响

本试验结果表明，储存 28 d，各组间哈氏单位和蛋白高度没有显著差异，但随着储存时间的延长哈氏单位和蛋白高度均降低。哈氏单位由浓蛋白高度和蛋重计算而得，蛋鸡的品种、年龄和鸡蛋的储存时间等均影响哈氏单位，哈氏单位大说明鸡蛋中蛋白高、蛋新鲜[16]。本试验中，储存时间对鸡蛋蛋白高度和哈氏单位影响显著，且随着储存时间延长鸡蛋哈氏单位、蛋白高度不断降低，而哈氏单位与储存时间存在一定函数关系[17]。

3.4　不同 DHA 源和添加水平对蛋黄脂肪酸含量和组成的影响

蛋黄脂肪酸组成与饲粮脂肪酸组成密切相关[8]，饲喂 14~15 d 后蛋黄中 DHA 沉积量达

到稳定[18-19]。饲喂 4 周，饲粮中添加任何富含ω-3 PUFA 的原料都会增加蛋黄中ω-3 PUFA 的含量，且 DHA 会优先沉积于蛋黄中[20]。饲粮中加入 60 g/kg 的鲱鱼油（11%EPA 和 9%DHA）使蛋中 DHA 达到每枚 150~200 mg，EPA 含量达到每枚 40~60 g[21]；饲粮中分别添加 1.5%和 3.0%FO，蛋黄中 DHA 占总脂肪酸的 2.43%和 3.16%[22]；0.5%和 2.0%的 MO 能显著增加蛋黄中 DHA 含量（18 和 31 mg/g），DHA 不仅沉积到蛋黄中，还能沉到到血浆和组织中[23]。本试验研究表明，蛋黄 DHA、PUFA 和ω-3 PUFA 含量均随 DHA 添加水平升高而极显著增加，其中 7 组蛋黄 DHA 含量最高达 13.23 mg/g，ω-3 PUFA 含量为 17.81 mg/g。本试验中，相同 DHA 添加水平，FO 组蛋黄 DHA 沉积量高于 MO 组，可能是因为 FO 组饲粮中不仅含有 DHA，且 EPA 也较高，EPA 在蛋鸡体内转化为 DHA 沉积于蛋黄中。试验结果表明补充 MO 和 FO 促进了蛋黄中ω-3 PUFA 的沉积，同时降低蛋黄中ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值，优化了蛋黄脂肪酸组成。

MO 中 DHA 主要为甘油三酯型 DHA（TG-DHA），吸收效率约 50%[24]。蛋中 DHA 沉积效率随饲粮中 DHA 添加量的增加有降低趋势，当饲粮中添加 1%、2%和 3%的裂殖壶菌粉时，添加量超过 2%蛋黄中 DHA 含量不会继续增加[25]；饲粮添加 1.5%和 3.0%的 FO（ω-3 PUFA 含量分别为 0.462%和 0.924%），蛋黄ω-3 PUFA 沉积效率分别为 22%和 18%，表明高剂量降低沉积效率[26]；饲粮中分别添加 5%和 10%（0.076%和 0.152% ω-3 PUFA）的微拟球藻，蛋中ω-3 PUFA 沉积效率分别为 25%和 20%[4]。研究表明，在蛋鸡饲粮中添加 1.2 mg/g 的ω-3 PUFA 使蛋中沉积效率最高[8]。本试验在 DHA 添加水平为 1.35 mg/g 时蛋黄中 DHA 沉积效率最高，与前人研究结果一致。

4 结 论

① 饲粮中分别添加MO和FO对试验中（4和8周）蛋壳强度、哈氏单位、蛋白高度、蛋黄颜色、蛋黄指数有一定影响，但对试验末期（12周）各项蛋品质无显著影响。

② 储存时间对蛋黄MDA含量、鸡蛋失水率、哈氏单位、蛋白高度和蛋黄颜色有显著影响。

③ 相同DHA添加水平下，与MO相比，FO能促进蛋黄DHA、EPA的沉积，添加水平为1.35 mg/g时DHA沉积效率最高。

④ 随着DHA添加水平提高，蛋黄DHA、ALA、EPA和ω-3 PUFA含量均显著增加，表明蛋黄中脂肪酸含量受饲粮脂肪酸水平影响显著。

参考文献：

[1] LEMAHIEU C,BRUNEEL C,RYCKEBOSCH E,et al.Impact of different omega-3

polyunsaturated fatty acid (n-3 PUFA) sources (flaxseed,*Isochrysis galbana*,fish oil and DHA Gold) on n-3 LC-PUFA enrichment (efficiency) in the egg yolk[J].Journal of Functional Foods,2015,19:821–827.

[2] 龙烁,王浩,武书庚,等.二十二碳六烯酸的生理学功能及其在家禽生产中的应用[J].动物营养学报,2017,29(4):1101–1109.

[3] SALEH A A.Effects of fish oil on the production performances,polyunsaturated fatty acids and cholesterol levels of yolk in hens[J].Emirates Journal of Food & Agriculture,2013,25(8):605–612.

[4] BRUNEEL C,LEMAHIEU C,FRAEYE I,et al.Impact of microalgal feed supplementation on omega-3 fatty acid enrichment of hen eggs[J].Journal of Functional Foods,2013,5(2):897–904.

[5] 王浩,王晓翠,张海军,等.饲粮胆碱和裂殖壶菌油联合添加促进二十二碳六烯酸在鸡蛋卵黄中的富集[J].动物营养学报,2017,29(7):2374–2383.

[6] 卢元鹏,原爱平,朱志刚,等.日粮不同ω-3多不饱和脂肪酸水平对绍兴鸭产蛋性能与蛋品质的影响[J].江苏农业学报,2009,25(5):1086–1090.

[7] 马海滨.日粮中添加不同油脂对鸡蛋不饱和脂肪酸含量和蛋品质的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2009.

[8] LEMAHIEU C,BRUNEEL C,TERMOTE-VERHALLE R,et al.Effect of different microalgal n-3 PUFA supplementation doses on yolk color and n-3 LC-PUFA enrichment in the egg[J].Algal Research,2014,6:119–123.

[9] PAPPAS A C,ACAMOVIC T,SPARKS N H C,et al.Effects of supplementing broiler breeder diets with organic selenium and polyunsaturated fatty acids on egg quality during storage[J].Poultry Science,2005,84(6):865–874.

[10] HAMMERSHØJ M.Effects of dietary fish oil with natural content of carotenoids on fatty acid composition,n-3 fatty acid content,yolk colour and egg quality of hen eggs[J].Archiv Fur Gefluegelkunde,1995,59(3):189–197.

[11] 肖俊峰.日粮锰源和水平对产蛋鸡蛋壳品质的影响及其机理[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2014.

[12] SONG J H,FUJIMOTO K,MIYAZAWA T.Polyunsaturated (n-3) fatty acids susceptible to peroxidation are increased in plasma and tissue lipids of rats fed docosahexaenoic

acid-containing oils[J].Journal of Nutrition,2000,130(12):3028–3033.

[13] KING E J,HUGO A,WITT F H D,et al.Effect of dietary fat source on fatty acid profile and lipid oxidation of eggs[J].South African Journal of Animal Science,2012,42(5):503–506.

[14] AO T,MACALINTAL L M,PAUL M A,et al.Effects of supplementing microalgae in laying hen diets on productive performance,fatty-acid profile,and oxidative stability of eggs[J].The Journal of Applied Poultry Research,2015,24(3):394–400.

[15] CHANMUGAM P,BOUDREAU M,BOUTTE T,et al.Incorporation of different types of n-3 fatty acids into tissue lipids of poultry[J].Poultry Science,1992,71(3):516–521.

[16] WANG X C,WU S G,ZHANG H J,et al.Effect of dietary protein sources and storage temperatures on egg internal quality of stored shell eggs[J].Animal Nutrition,2015,1(4):299–304.

[17] 侯卓成,杨宁,李俊英,等.鸡蛋新鲜度随保存时间的变化规律[J].中国畜牧杂志,2008,44(13):42–45

[18] HU X C,REN L J,CHEN S L,et al.The roles of different salts and a novel osmotic pressure control strategy for improvement of DHA production by *Schizochytrium* sp.[J].Bioprocess and Biosystems Engineering,2015,38(11):2129–2136.

[19] 陈秀丽,李连彬,岳洪源,等.裂殖壶菌粉对鸡蛋品质与蛋黄 n-3PUFA 含量的影响[J].中国畜牧杂志,2014,51(23):66–70.

[20] LEMAHIEU C,BRUNEEL C,TERMOTE-VERHALLE R,et al.Impact of feed supplementation with different omega-3 rich microalgae species on enrichment of eggs of laying hens[J].Food Chemistry,2013,141(4):4051–4059.

[21] GONZALEZESQUERRA R,LEESON S.Effect of feeding hens regular or deodorized menhaden oil on production parameters,yolk fatty acid profile,and sensory quality of eggs[J].Poultry Science,2000,79(11):1597–1602.

[22] CEYLAN N,CIFTÇI I,MIZRAK C,et al.Influence of different dietary oil sources on performance and fatty acid profile of egg yolk in laying hens[J].Journal of Animal & Feed Sciences,2011,20(1):71–83.

[23] CHENG C H,SHEN T F,CHEN W L,et al.Effects of dietary algal docosahexaenoic acid oil supplementation on fatty acid deposition and gene expression in laying Leghorn hens[J].Journal of Agricultural Science,2005,142(6):683–690.

[24] XIAO T,LI Z J,JIE X,et al.Short term effects of different omega-3 fatty acid formulation on

lipid metabolism in mice fed high or low fat diet[J].Lipids in Health and Disease,2012,11:70.

[25] 陈秀丽,岳洪源,李连彬,等.裂殖壶菌粉对蛋鸡生产性能、蛋品质、血清生化指标和蛋黄二十二碳六烯酸含量的影响[J].动物营养学报,2014,26(3):701–709.

[26] CACHALDORA P,GARCÍA-REBOLLAR P,ALVAREZ C,et al.Effect of type and level of fish oil supplementation on yolk fat composition and n-3 fatty acids retention efficiency in laying hens[J].British Poultry Science,2006,47(1):43–49.

Effects of Microalgae Oil and Fish oil on Egg Quality and Yolk Fatty Acid Deposition of Hens

LONG Shuo[1] WU Shugeng[1*] QI Guanghai[1] ZHANG Haijun[1*] WANG Jing[1] MA Youbiao[1] YANG Linlin[1] YU Zhenjun

（1. *Key Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture, National Engineering Research Center of Biological Feed, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing* 100081*, China*; 2. *Beijing Municipal Agricultural Machinery Test And Identification Promotion Station, Beijing* 100081*, China*）

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of dietary microalgae oil (MO) and fish oil (FO) on yolk fatty acid deposition and egg quality (fresh and during storage period) of hens, with the aim to provide basis for the production of docosahexaenoic acid （DHA） enriched eggs. Six hundred and thirty Hy-Line Brown laying hens of 31-week-old with similar laying rate were randomly allotted into 7 groups with 6 replicates per group and 15 hens per replicate. The laying hens in the control group were fed a basal diet without adding exogenous DHA sources, and the other six groups were fed the basal diets supplemented with either MO or FO at three different doses of 1.35, 2.70 and 5.40 mg/g DHA, and the supplemental levels of MO were 0.25%, 0.50% and 1.00%, while the supplemental levels of MO were 1.08%, 2.17% and 4.34%, respectively. The feeding trial lasted for 12 weeks after 1 week of adaption. The results showed as follows: 1) at the end of the experimental period, eggshell strength, eggshell thickness, egg shape index and Haugh unit were not significantly different among different groups (P>0.05), the albumen height in 1.35 mg/g DHA groups was significantly higher than that in 2.70 and 5.40 mg/g DHA groups at the end of the 4th week (P<0.05). Compared with the control group, yolk color was significantly increased in experimental groups at the end of the 8th week (P<0.05). 2) No differences were found for malondialdehyde （MDA） content in yolk among all groups when

stored for 28 d. The storage period resulted in significantly linear increase of yolk MDA content (P<0.05). 3) MO groups had a significantly higher Haugh unit than that in FO groups when stored for 14 d. And after egg stored for 14 d, the interaction of DHA source and supplemental level showed significant effects on albumen height (P<0.05), and the albumen height was increased as dietary DHA level was increased in MO groups, while the albumen height was initially increased and then decreased as dietary DHA level was increased in FO groups. The yolk color in FO groups was significantly higher than that in MO groups when stored for 7 and 28 d (P<0.05). 4) Compared with the control group, dietary different sources and levels of DHA significantly increased contents of DHA, α-linolenic acid, eicosapentaenoic acid, monounsaturated fatty acid and ω-3 polyunsaturated fatty acid (PUFA) in yolk (P<0.05), and which in FO groups were significantly higher than those in MO groups (P<0.05). Dietary different sources and levels of DHA significantly decreased the ratio of ω-6 PUFA to ω-3 PUFA (P<0.05). The DHA deposition efficiency in eggs was extremely significantly decreased as DHA supplemental level increasing (P<0.05). In conclusion, compared with MO, FO is more effective to enhance the DHA enrichment in egg yolk and the 1.35 mg/g supplemental level has the highest deposition efficiency.

Key words: microalgae oil; fish oil; DHA; egg quality; deposition efficiency; laying hens

---

*Corresponding authors: WU Shugeng, professor, E-mail: wushugeng@caas.cn; ZHANG Haijun, associate professor, E-mail: fowlfeed@163.com (责任编辑　田艳明)